

AALTO-YLIOPISTO

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Elektroniikan laitos
Valaistusyksikkö

Janne Anderson

LED-valaistus kasvihuoneisiin

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 10.5.2010

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja TkT Paulo Pinho

Tekijä: Janne Anderson

Työn nimi: LED-valaistus kasvihuoneisiin

Sivumäärä: 36

Päivämäärä: 10.5.2010

Elektroniikan laitos/Valaistusyksikkö

Professuuri: S-118 Valaistustekniikka

Työn valvoja: Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja: TkT Paulo Pinho

Tiivistelmäteksti:

Valo on kasvien tärkein energian ja informaation lähde. Kasvihuoneviljelyssä voidaan keinovalaistuksen avulla pidentää kasvukautta sekä tehostaa tuotantoa. Keinovalaistuksen vaatima sähköenergia on merkittävä kuluerä suomalaisessa kasvihuoneviljelyssä.

Tässä työssä selvitettiin LED – valaistuksen soveltuvuutta kasvihuoneviljelyyn sekä ledien tuomia etuja nykyisiin järjestelmiin verrattuna. Ledien avulla on mahdollista päästä merkittäviin säästöihin energiankulutuksessa sekä parantaa sadon laatua optimoimalla valaistus viljeltävän kasvin tarpeiden mukaan. Painottamalla spektriä sinisen ja punaisen valon aallonpituuksilla saadaan kasvit hyödyntämään valon energiaa tehokkaammin. Tällä hetkellä markkinoilta ei vielä löydy laajamittaiseen kasvihuoneviljelyyn soveltuvaa lediratkaisua, mutta tutkimus ja tuotekehitys on käynnissä kautta maailman. Lähivuosina onkin odotettavissa merkittäviä muutoksia kasvihuoneiden valaistusjärjestelmiin.

Avainsanat: LED, kasvihuone, valaistus

Author: Janne Anderson

Name of the thesis: LED lighting for greenhouses Number of pages: 36

Date: 10.5.2010

Department of Electronics/Lighting Unit

Professorship: S-118 Illumination engineering

Supervisor: Professor Liisa Halonen

Instructor: D.Sc. Paulo Pinho

Abstract text:

Light is the most important source of energy and information for plants. Artificial lighting can be used in greenhouses to enable year-round production and to increase productivity. The electricity needed for the artificial lighting is a major expense in the Finnish greenhouse production.

The suitability of LED – lighting for greenhouse production and its advantages over current lighting solutions were investigated in this work. Major energy savings can be obtained along with increased quality of the plants by using optimised LED – lighting. The light utilisation of plants can be increased by emphasizing the blue and red wavelengths of the light spectrum. Currently no LED – based lighting solutions are available for large-scale greenhouse production but due to the on-going research and development major changes in greenhouse lighting can be expected in the near future.

Keywords: LED, greenhouse, lighting

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Teknillisen korkeakoulun valaistusyksikössä osana Tekesin rahoittamaa ”SSHLighting – Puolijohdevalaistusjärjestelmä kasvihuoneviljelyyn” -projektia. Työn valvojaa professori Liisa Halosta haluan kiittää erittäin mielenkiintoisesta aiheesta ja työn ohjaajaa TkT Paulo Pinhoa antamistaan neuvoista ja kommentteista. Kiitos myös valaistusyksikön työtovereille viihtyisästä työilmapiiristä.

Albert Grotenfeltille, Jorma Järviselle ja Juha Oksaselle kiitokset haastatteluista ja vierailuista kasvihuoneilla, sekä Marja Rantaselle konferenssimateriaalin lainasta.

Ystävääni Villeä haluan kiittää väsymättömästä kannustuksesta opintojeni pitkällä loppusuoralla sekä myös muita 3Kaveriani Lassea, JK:tä, Kimiä ja Akia. Heidän ansiosta muistin, mikä elämässä todella on tärkeää.

Isäni Sven ja isoveljeni Christian ansaitsevat suuret kiitokset antamastaan Insinöörin esikuvasta, ja äitini Liisa kannustuksesta ja hellästä huolenpidosta.

Suurimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin rakkaalle avovaimolleni Marjutille tuesta, kannustuksesta sekä asiantuntemuksesta diplomityön kirjoittamisen suhteen.

Espoossa toukokuun 10. päivänä 2010

Janne Anderson

Sisällysluettelo

Alkulause.....	4
Sisällysluettelo.....	5
Symboli- ja lyhenneluettelo.....	6
1 Johdanto.....	7
2 Valon vaikutukset kasveihin.....	8
2.1 Yhteyttäminen ja kasvaminen.....	8
2.2 Valon spektri.....	8
2.3 Fotonivuo.....	10
2.4 Valon suunta.....	11
2.5 Valotuksen kesto.....	12
2.6 Yhteenveto.....	12
3 Nykyiset ratkaisut kasvihuonevalaistuksessa.....	13
3.1 Yleistä.....	13
3.2 Case Järvikylä.....	15
3.2.1 Kasvihuonevalaistus Järvikylässä.....	15
3.3 Case Oksasen Puutarha.....	16
3.3.1 Kasvihuonevalaistus Oksasen Puutarhalla.....	16
4 Ledivalaistuksen hyödyt ja haitat kasvihuoneissa.....	17
4.1 Yleistä.....	17
4.2 Suurpainenatriumlampun spektri.....	18
4.3 Ledien edut kasvihuonevalaistuksessa.....	19
4.4 Ledien haitat kasvihuonevalaistuksessa.....	20
4.5 Yhteenveto.....	21
5 Tutkimuksia kasvihuonevalaistuksesta.....	23
5.1 Leditutkimuksen alkua.....	23
5.2 Tutkimuksia lehtisalaatin valotuksesta.....	23
5.2.1 Spektri.....	23
5.2.2 Fotonivuo ja valojakson pituus.....	24
5.2.3 Valotuksen vaikutus ravintosisältöön.....	25
5.3 Muita tutkimuksia kasvihuonevalaistuksesta.....	26
5.4 Leditutkimuksen nykytila.....	26
5.5 Yhteenveto.....	26
6 LED-kasvihuonevalaistuksen case-kohteita.....	27
6.1 Yleistä.....	27
6.2 Case Philips.....	28
6.3 Case Valoya.....	28
6.4 Case Lioris.....	28
6.5 Case Netled.....	28
6.6 Case Fionia Lighting.....	29
6.7 Case Heliospectra.....	29
6.8 Case Lemnis Lighting.....	29
6.9 Yhteenveto.....	30
7 Tulevaisuuden valaistusratkaisut kasvihuoneissa.....	31
8 Johtopäätökset ja jatkotutkimuksen tarve.....	32
9 Lähteet.....	33

Symboli- ja lyhenneluettelo

λ	sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus
c	valon nopeus
DLI	daily light integral, päivän kokonaisvalomäärä
E	fotonin energia
h	Planckin vakio
LED	light emitting diode, valoa emittoiva diodi, ledi
NASA	National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto
PAR	photosynthetically active radiation, fotosynteettisesti aktiivinen säteily
PPF	photosynthetic photon flux, fotosynteettinen fotonivuo
ppm	parts per million, miljoonasosa

1 Johdanto

Kylmän ja pimeän talven takia merkittävä osa Suomessa kulutettavista kotimaisista vihanneksista ja kasviksista kasvatetaan kasvihuoneissa. Kasvihuoneviljelyllä varmistetaan ympärivuotinen sato sekä mahdollistetaan sellaisten kasvien viljely, jotka muuten eivät menestyisi pohjoisessa ilmastossamme. Etuna on myös ilmasto-olosuhteiden säädeltävyys kasvin tarpeiden mukaan ja siten tasalaatuisen sadon varmistaminen säästä ja vuodenajasta riippumatta.

Kasvihuoneiden energiankulutus nostaa tuotantokustannuksia merkittävästi, esimerkiksi tomaatin tuotantokustannuksista noin neljäsosa on peräisin keinovalaistukseen käytetystä sähköenergiasta (Karhu 2007). Kurkulla sähköenergian osuus tuotantokustannuksista on jopa kolmannes (Huhtamaa 2009). Optimoidulla ledivalaistuksella on mahdollista parantaa kasvihuoneiden kannattavuutta mm pienentyneen energiankulutuksen myötä sekä sijoittamalla valaisimet lähemmäksi viljeltäviä kasveja ja käyttämällä ns. välivalotusta.

2 Valon vaikutukset kasveihin

Auringon säteily on maapallon tärkein energianlähde. Aurinko emittoi säteilyä jatkuvana spektrinä ja noin puolet Maan ilmakehään saapuvasta energiasta läpäisee ilmakehän päätyen Maan pinnalle. Tästä säteilyenergiasta 300 – 1000 nm aallonpituuksien väliin jäävää spektrialuetta kutsutaan biologiseksi ikkunaksi, koska vain tällä spektrialueella on biologisia vaikutuksia kasveille. Yli 1000 nm säteilyllä ei ole tarpeeksi energiaa aiheuttamaan valokemiallisia muutoksia kasvien molekyyileissä kun taas alle 300 nm säteilyn energia riittää hajottamaan kemiallisia sidoksia. (Hart 1988)

Kasveilla tiedetään olevan ainakin kolme erilaista valosysteemiä valon energian ja informaation käsittelyyn. Valosysteemit koostuvat kolmesta vaiheesta, joita ovat valon absorbointi valoreseptoreiden avulla, valoenergian muuntaminen biokemialliseen muotoon sekä kasvin fyysinen vaste valoon. Kasvien valoreseptoreilla on kullakin oma tyypillinen absorptiospektrinsä. Samat säteilyolosuhteet voivat aiheuttaa toisistaan poikkeavia fyysisiä vasteita eri kasvilajien välillä riippuen niiden geneettisistä ominaisuuksista. (Hart 1988)

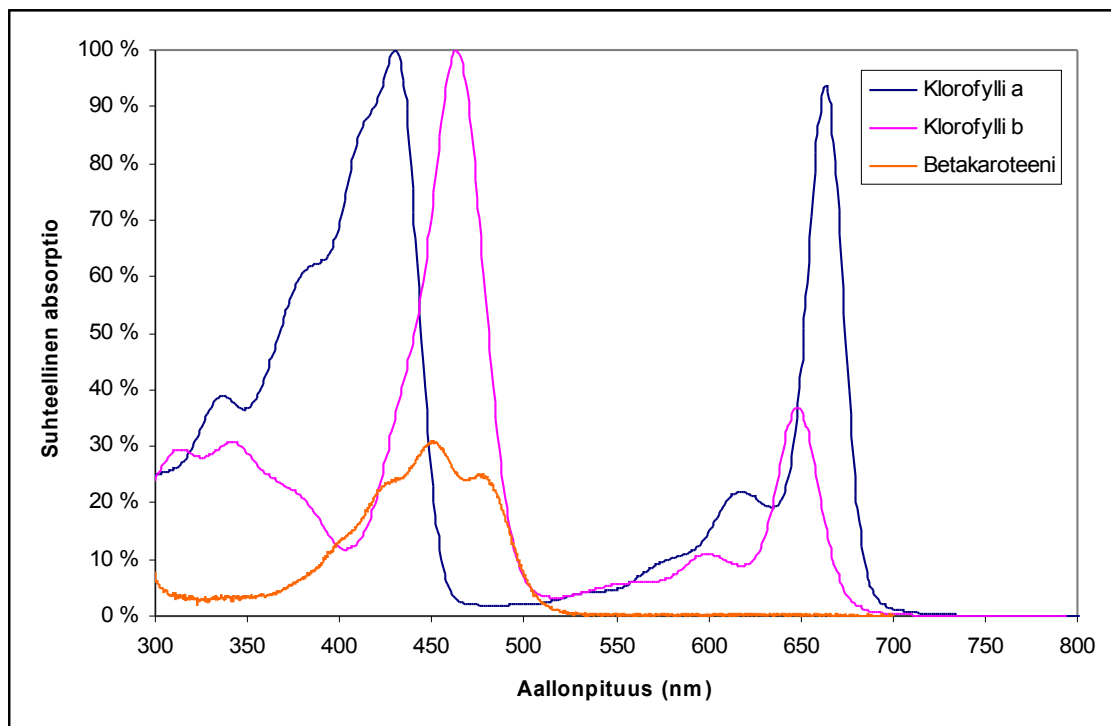
2.1 Yhteyttäminen ja kasvaminen

Alle puolet biologisen ikkunan säteilyenergiasta on ihmissilmälle näkyvää 400 – 700 nm valoa. Kasvit käyttävät tätä spektrialuetta energianlähteenä yhteyttämiseen. Yhteyttämisessä kasvit sitovat epäorgaanisia lähtöaineita orgaanisiin yhdisteisiin valon energian avulla. Tärkein yhteyttämisreaktio on hiilidioksidin yhteyttäminen, jossa hiilidioksidista ja vedestä muodostetaan valon avulla glukoosia ja happea. Glukoosia ja muita yhteyttämistuotteita kasvi käyttää edelleen solujen rakennusaineina sekä aineenvaihdunnan energianlähteinä. (Hart 1988; Fagerstedt et al. 2008)

2.2 Valon spektri

Yhteyttämiselle välttämätöntä 400 – 700 nm aallonpituusalueutta kutsutaan fotosynteettisesti aktiiviseksi säteilyksi (photosynthetically active radiation, PAR). Kasvien fotosynteettiset pigmentit, klorofyllit ja karotenoidit, absorboivat valoenergiaa ja muuttavat sitä kemialliseksi energiaksi. Pigmenttien erilaiset absorptiospektrit varmistavat säteilyn hyödyntämisen laajalla aallonpituusalueella. Erityisesti sinisen (425 – 475 nm) ja punaisen (625 – 675 nm) valon aallonpituudet ovat kasveille tärkeitä

kasvun kannalta. (Hart 1988) Kuvassa 1 on esitetty pigmenttien absorptiospektrit (Frigaard et al. 1996; Dixon et al. 2004).



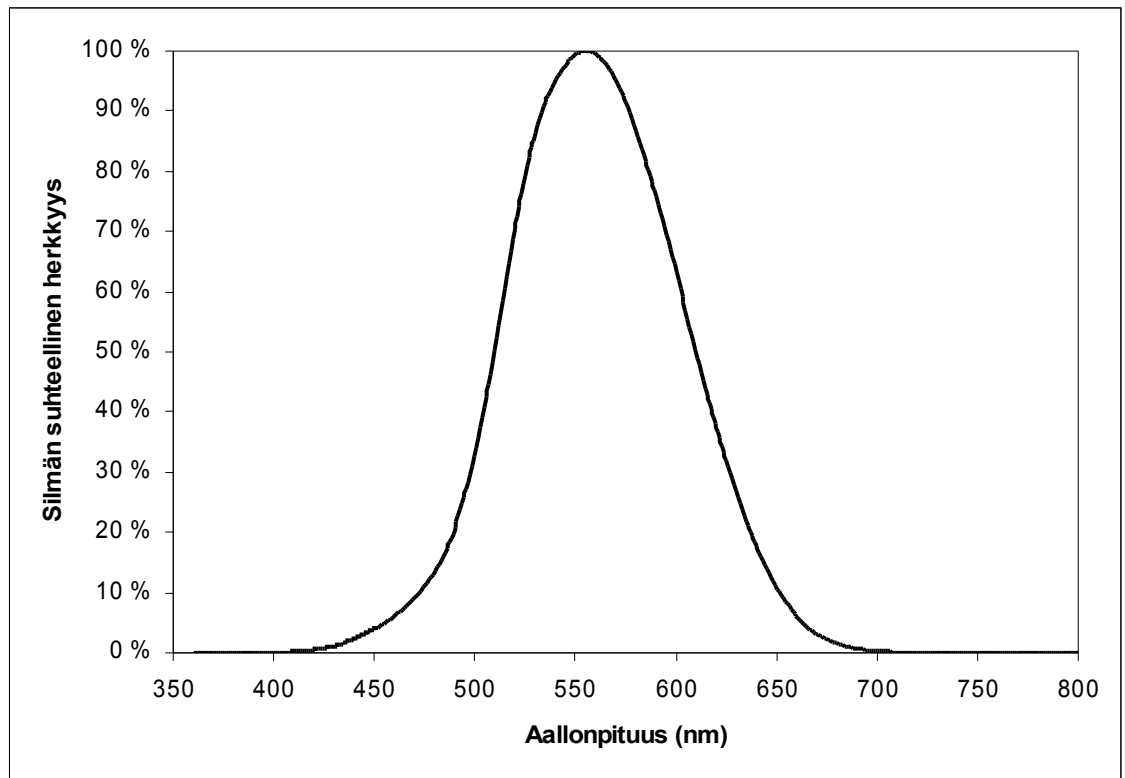
Kuva 1. Eräiden fotosynteettisten pigmenttien absorptiokäyrät (Frigaard et al. 1996; Dixon et al. 2004).

Sähkömagneettisella säteilyllä on kolme vuorovaikutustapaa osuessaan kohteeseen. Säteilyn ja kohteen ominaisuuksista riippuen se heijastuu, absorboituu tai läpäisee kohteen. Vihreiden kasvien väri johtuu siitä, että ne absorboivat tehokkaammin sinisen ja punaisen valon aallonpituuksia heijastaen suhteessa enemmän vihreän valon aallonpituuksia.

Useissa tutkimuksissa (mm. Li & Kubota 2009; Yanagi et al. 1996; Poudel et al. 2007) on sinisen valon todettu tekevän kasveista tiiviitä ja kompakteja, kun taas punainen valo saa kasvin varren kasvamaan pituutta. Punaisen valon pieni määrä suhteessa kaukopunaiseen (700 – 800 nm) valoon saa kasvit hakeutumaan valoa kohti (Li & Kubota 2009). Vihreän valon merkitys kasveille on huomattavasti pienempi, mutta toisaalta se heijastuu ylemmistä lehdistä ja osittain läpäisee niitä. Näin vihreä valo pystyy tunkeutumaan usean heijastuksen kautta syvemmälle kasvustossa, jolloin kasvin alemmatkin lehdet saavat tarvitsemaansa valoa. (Folta & Maruhnich 2007) Valon spektrijakaumaa säätämällä voidaan myös vaikuttaa kasvien ravintosisältöön (Li & Kubota 2009; Urbanavičiūtė et al. 2008).

2.3 Fotonivuo

Spektrin lisäksi valon irradianssilla on kasveille merkitystä. Valaistustekniikan perussuureita painotetaan ihmisen silmän herkkyyssäyrällä (kuva 2), joka eroaa huomattavasti kasvien fotosynteesisten pigmenttien absorptiokäyristä. Siten valaistusvoimakkuuden yksikkö luks ei sovellu käytettäväksi kasvivalotuksen yhteydessä.



Kuva 2. Ihmissilmän spektriherkkyys.

Max Planckin vuonna 1901 esittämän ja Albert Einsteinin myöhemmin todistaman teorian mukaan valolla on aaltoluonteen lisäksi myös hiukkasluonne (Planck 1901; Einstein 1905). Sähkömagneettinen säteily koostuu massattomista hiukkasista, kvanteista, joita näkyvän valon alueella kutsutaan myös fotoneiksi. Yhden fotonin energia on kääntäen verrannollinen sen aallonpituuteen yhtälön

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

mukaan, missä

h on Planckin vakio $6,626076 \cdot 10^{-34}$ Js

c on valon nopeus $2,9979 \cdot 10^8$ m/s

λ on valon aallonpituus.

Kasvien valoreseptorit absorboivat valoa kvantteina ja Stark – Einsteinin -lain mukaan fotonit voi virittää yhden molekyylin absorboituessaan. Yhteyttämisen kannalta valokvanttien määrällä on suurempi merkitys kuin niiden energialla, joten parhaiten kasvien käytössä olevan valon määrää kuvaa ns. fotosynteettinen fotonivuon (photosynthetic photon flux, PPF), joka ilmaisee pinnalle saapuvien 400 – 700 nm fotonien lukumäärän aikayksikössä. Fotonivuon yksikkönä on $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, missä 1 mol tarkoittaa $6,022 \cdot 10^{23}$ fotonia. (Hart 1988)

Valon määrä voidaan ilmaista myös päivän kokonaisintegraalina (daily light integral, DLI). Tällöin fotonivuon keskiarvo kerrotaan valojakson pituudella. Lehtisalaatin kasvatuksessa on esitetty kasvihuoneen tuottavuuden kannalta optimaaliseksi kokonaisvalomääräksi $17 \text{ mol}/\text{m}^2\text{d}$, jos kasvihuoneessa ei käytetä lisähiilidioksidia. (Both et al. 1997; Ferentinos et al. 2000) Käytännössä asia ei aina ole niin yksinkertainen, sillä liian nopea kasvu altistaa lehtisalaatin lehdenreunapoltteelle, joka heikentää sadon laatua. Sekä luonnonvalon että keinovalon lisääminen nostaa kasvihuoneen lämpötilaa, jolloin ilmanvaihdon tarve nousee. Lisääntynyt ilmanvaihto puolestaan pienentää lisähiilidioksidin konsentraatiota ja siitä saatavaa hyötyä. Kasvihuoneviljelyn tuottavuuteen vaikuttavat siten mm. luonnonvalon määrä, ulkolämpötila, sähkön ja hiilidioksidilisäyksen hinta sekä sadon määrä ja myyntihinta. (Both et al. 1998; Ferentinos et al. 2000; Heuvelink & Challa 1989; van 't Ooster et al. 2007)

2.4 Valon suunta

Kasvit ohjaavat kasvuaan myös valon suunnan perusteella. Sinisen valon reseptorit saavat kasvin kasvamaan joko valoa kohti tai siitä poispäin, riippuen kumpi on kasvin kannalta hyödyllisempää. Heliotrooppiset kasvit, kuten esimerkiksi auringonkukka, kääntyvät päivän aikana valon suunnan muuttuessa. Auringon seuraamisen tarkoitus vaihtelee eri kasveilla, ja siten kasvi voi maksimoida käytössään olevan säteilyn tai vaihtoehtoisesti minimoida voimakkaan päivänvalon aiheuttaman lämpökuormituksen. (Hart 1988)

2.5 Valotuksen kesto

Valotuksen kesto kertoo kasveille päivän ja yön sekä vuodenaikojen vaihtelusta. Näin kasvit voivat laskea lehtensä yöllä, kun valoenergiaa ei ole tarjolla eikä ylimääräistä lämpöä tarvitse haihduttaa lehtien kautta. Muuttuva päivän pituus puolestaan vaikuttaa kasvien eri kehitysvaiheisiin. (Hart 1988) Esimerkiksi joulutähti vaatii kukkiakseen vähintään viidenkymmenen päivän jakson, jolloin päivän pituus on alle 12 tuntia (Raukko & Jalkanen 2009). Lehtisalaatin kasvatuksessa voidaan myös ehkäistä lehdenreunapoltetta ilman merkittävää kasvun hidastumista nopeuttamalla valoisan ja pimeän ajan vaihtelua (Goto & Takakura 2003).

2.6 Yhteenveto

Valon spektriä, fotonivirtaa ja rytmitystä säätämällä voidaan vaikuttaa kasvien kasvamiseen ja kehittymiseen. Kasvilajien väliset tarpeet valolle vaihtelevat, esim. kurkku ja tomaatti hyötyvät lehtisalaattiin verrattuna selvästi korkeammasta fotonivirrasta. Lisäksi kurkku- ja tomaattiköynnösten alemmat lehdet jäävät helposti ylempien lehtien varjoon, jos niitä valotetaan vain ylhäältä. Osa valaisimista voidaan korkeilla kasveilla sijoittaa kasvatusrivien väliin, jolloin valo saadaan jakautumaan tasaisemmin kasvin eri osiin. Kasvihuonevalaistusta suunniteltaessa tuleekin ottaa huomioon viljeltävän lajikkeen tarpeet valotuksen suhteen, mutta myös myytävän lopputuotteen laatuvaatimukset. Lehtisalaatin viljelyssä vegetatiivinen kasvu ja lehtien koko on avainasemassa, kun taas kurkulla ja tomaatilla on hedelmien koko ja määrä tärkeää. Leikkokukat puolestaan korjataan juuri kukkimisen kynnyksellä, jotta ne kestävät kuluttajalla mahdollisimman pitkään.

3 Nykyiset ratkaisut kasvihuonevalaistuksessa

Tässä luvussa luodaan katsaus kasvihuoneissa nykyisin käytössä oleviin valotus- ja viljelymenetelmiin sekä käsitellään tarkemmin kahden suomalaisen kasvihuoneviljelijän käyttämiä valotusratkaisuja lehtisalaatin viljelyssä. Tiedot on saatu vierailemalla kasvihuoneilla sekä haastatteleamalla viljelijöitä.

3.1 Yleistä

Lehtisalaatin viljely nykyaikaisissa kasvihuoneissa on pitkälle automatisoitua teollista tuotantoa, jossa tietokoneohjatut järjestelmät tarkkailevat jatkuvasti kasvihuoneen ilmasto-olosuhteita ja säättävät tarpeen mukaan kasvihuoneen lämmitystä, tuuletusta, hiilidioksidipitoisuutta ja valaistusta. Reaaliaikaisella säädöllä pyritään ylläpitämään kasveille edullista kasvuympäristöä ulkolämpötilan ja luonnonvalon vaihtelusta huolimatta.

Varsinainen kasvatus tapahtuu asettamalla salaatin taimet kasvatuspöydällä poikittain olevaan pitkään kasvatuskouruun kasvihuoneen päässä. Kourua siirretään koneellisesti eteenpäin kasvatuspöydällä siten, että kasvit ovat valmiita korjattavaksi, kun ne saavuttavat kasvihuoneen vastakkaisen päädyn. Lehtisalaatilla kasvatus kestää tyypillisesti noin neljästä viikosta ylöspäin riippuen luonnonvalon määrästä.



Kuva 3. Salaatinkasvatuslinjasto, Oksasen Puutarha. Kourut kulkevat kasvatuspöydällä nuolen osoittamaan suuntaan. Kuvan keltaisuus johtuu suurpainelamppujen keltapainotteisesta valosta.

Kasteluveden ja ravinteiden annostelu hoidetaan pumppaamalla ravinneliuosta jatkuvasti kourun päähän. Kasvatuspöytä on kallistettu, jolloin kasteluvesi ja ravinteet valuvat painovoiman avulla kourun toiseen päähän kastellen samalla kasvien juuret. Kierron päätteeksi otetaan kasveilta käyttämättä jäänyt kasteluvesi talteen ja siitä voidaan analysoida kasvien kuluttamat ravinteet sekä lisätä niitä tarpeen mukaan.

Kasvihuoneen katto on valmistettu kirkkaasta lasista tai muovista, jotta luonnonvalon määrä saadaan maksimoitua. Tarpeen vaatiessa voidaan myös erilaisilla kalvoilla ja verhoilla suodattaa liiallista auringonvaloa tai vähentää kasvihuonetta lämmittävän infrapunasäteilyn pääsyä sisälle. Keskitalven pakkasilla, kun luonnonvalon määrä on vähäisimmillään, voidaan kalvoilla parantaa kasvihuoneen lämmöneristystä ja siten vähentää ulkopuolelle karkaavaa lämpöä.

Suurpainenatriumlamput ovat suosittuja kasvihuonevalaistuksessa niiden korkean valotehokkuuden takia. Valaisimet pyritään asentamaan siten, että kasvustoon saadaan mahdollisimman tasainen valaistus luonnonvaloa varjostamatta. Salaatin viljelyssä tämä käytännössä tarkoittaa vähintään 400 W lamppujen käyttöä ja noin 100 W/m² asennustehoa. Vaikka valaistus olisi kasvien kannalta oikeaoppisempaa mitoittaa fotosynteesin fotonivuon mukaan, tehdään valaistus- ja sähkösuunnittelu edelleen

kulutettavan sähkötehon mukaan. Lamppuvalmistajat ilmoittavat usein datalehdissään lampun säteilemän kokonaisfotonivuon, josta lasketaan valaisimien asennuskorkeuden ja valonjaon avulla tarvittava asennusteho. Valaistusta voidaan ohjata automaattisesti ottaen huomioon hetkellinen luonnonvalon määrä, päivän pituus sekä ennustettu päivän kokonaisvalomäärä.

3.2 Case Järvikylä

Järvikylän kartano Joroisissa on Suomen suurimpia ruukkuvihannesten tuottajia. Tuotevalikoimaan kuuluu perinteisiä *Grand Rapids* -salaattilajikkeita sekä erikoissalaatteja, kuten lollo rosso, tammenlehtisalaatti, roomansalaatti sekä jääsalaatti. Viljeltävät lajikkeet saattavat vaihdella hyvinkin paljon tuotteiden kysynnän mukaan, ja erikoissalaattien menekki onkin kasvanut voimakkaasti viime vuosina. Lehtisalaatin lisäksi kasvihuoneissa tuotetaan yli kahtakymmentä erilaista yrttiä.

Lehtisalaattia Järvikylässä viljellään noin 4,2 hehtaarin pinta-alalla vuosituotannon ollessa 18 – 19 miljoonaa kappaletta. Lehtisalaatti kasvatetaan vähintään 100 g kokoiseksi ja kasvu aika vaihtelee kesän 25 – 32 vuorokaudesta talven 40 – 55 vuorokauteen. Kasvihuoneautomaatiikka huolehtii kasvuolosuhteista mittaamalla kasvihuoneen lämpötilaa, hiilidioksidipitoisuutta ja kosteutta sekä luonnonvalon määrää. Mittausten ja sääennusteen perusteella automaatiikka ohjaa lämmityskattilaa, propaanipoltinta sekä tuuletusluukkuja. Tavoitteena on pitää kasvihuoneen lämpötila 13 – 16 asteessa, hiilidioksidipitoisuus 1200 ppm:ssa sekä kosteus 70 – 80 %:ssa.

3.2.1 Kasvihuonevalaistus Järvikylässä

Kasvihuoneen keinovalaistus on Järvikylässä toteutettu Philips SON-T 400 W ja 600 W suurpainenaatriumlampuilla. Valaisimet on asennettu 1,8 – 2 metrin etäisyydelle kasveista noin 100 W/m² asennusteholla. Lamppujen tekniikan kehityksen myötä voidaan uudemmillä lampuilla käyttää hieman pienempää asennustehoa. Valaisimia huolletaan pesemällä heijastimet tarvittaessa sekä vaihtamalla ne uusiin muutaman vuoden välein. Lamput uusitaan noin kahden vuoden välein.

Lehtisalaattia valotetaan 20 tuntia vuorokaudessa. Kesällä keinovalojen käyttö painottuu yöaikaan, kun taas talvella keinovalotusta tarvitaan vuorokauden ympäri. Vuorokauden pimeä jakso voidaan talvisin ajoittaa iltaan, jolloin sähköenergian tuntihinta on yleensä korkeimmillaan. Automaatiikka ottaa valaistuksen ohjauksessa huomioon vallitsevan

valotason, päivän aikana toteutuneen valosumman sekä koko vuorokaudelle ennustetun valosumman ja kytkee tarvittaessa kaikki valaisimet päälle tai pois.

3.3 Case Oksasen Puutarha

Oksasen Puutarha Paattisissa viljelee pääasiassa *Grand Rapids Ritsa* -lajiketta sekä jääsalaattia. Viljelypinta-alaa on 3,2 hehtaaria ja vuosituotanto on 12 – 13 miljoonaa kappaletta. Lehtisalaatti on valmis myyntiin, kun lehtimassan paino on vähintään 110 g. Kesällä kasvatukseen kuluu noin 28 päivää ja talvella noin 38 päivää.

Kasvihuoneautomaatiikalla pyritään pitämään kasvihuoneen lämpötila 16 asteessa, hiilidioksidipitoisuus 800 ppm:ssa sekä kosteus 78 %:ssa lämmityksen ja tuuletuksen avulla. Tuuletusluukkujen ollessa avoinna ei hiilidioksidia lisätä kasvihuoneeseen.

3.3.1 Kasvihuonevalaistus Oksasen Puutarhalla

Oksasen Puutarhan keinovalaistuksessa käytetään Osramin 400 W suurpainenatriumlamppuja. Valaisimet on asennettu noin kahden metrin etäisyydelle kasveista ja asennusteho on 100 W/m². Valaisimien heijastimet vaihdetaan ja pestään tarvittaessa ja lamput vaihdetaan kolmen vuoden välein.

Kesällä lehtisalaattia valotetaan keinovaloilla öisin sekä tarvittaessa korkean kosteuden aikana. Talvella valotus on ympärivuorokautista. Lajikkeesta riippuen pimeäjakson pituus vaihtelee 3 – 6 tunnin välillä. Automaatiikka kytkee puolet tai kaikki valaisimet päälle luonnonvalon säteilyn alittaessa 80 – 100 W/m², mutta järjestelmä ei pysty huomioimaan päivän kokonaisvalosummaa valotuksessa.

4 Ledivalaistuksen hyödyt ja haitat kasvihuoneissa

Ledien tekniikan nopea kehittyminen on tuonut viime vuosina uusia mahdollisuuksia valaistustekniikan eri osa-alueille. Muun muassa tievalaistuksessa voidaan muokata valaisimen spektriä siten, että optimoidaan spektri juuri niille aallonpituuksille, joilla ihmissilmä on herkin hämärässä valaistuksessa. Näin saadaan täytettyä tieosuuden luminanssivaatimukset nykyistä huomattavasti pienemmällä energiankulutuksella. Kotitalouksissa ledien pitkä polttoikä yhdistettynä alhaiseen energiankulutukseen tekee niistä varteenotettavan vaihtoehdon korvaamaan hehkulamput yleisvalaistuksessa.

Myös kasvihuonevalaistuksessa on mahdollista hyödyntää ledejä. Tässä luvussa vertaillaan ledivalaistusta kasvihuoneiden nykyisiin valaistusratkaisuihin sekä tarkastellaan ledien mukanaan tuomia etuja ja haittoja kasvivalotuksessa.

4.1 Yleistä

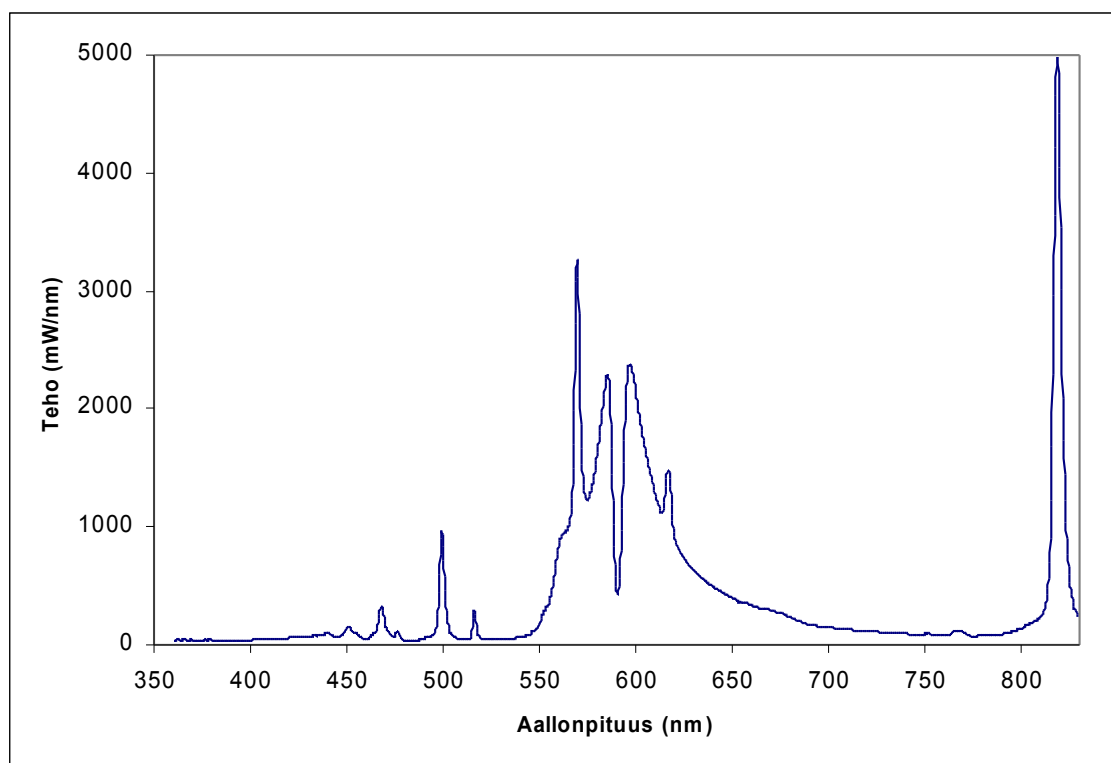
Ledien toimintaperiaate ja niiden säteilemä valo eroavat merkittävästi muista valonlähteistä. Ledien toiminnan ydin on puolijohderajapinta, joka muodostuu yhdistettäessä sopivat n- ja p-tyyppiset puolijohdemateriaalit. Rajapinnan läpi johdettava sähkövirta aiheuttaa elektronien ja aukkojen rekombinoitumista, jossa elektroni putoaa alemmalle energiatasolle ja emittoi samalla fotonin. Fotonin energia ja siten myös aallonpituus on riippuvainen energiatasojen erotuksesta, joten ledien säteilemän lähes monokromaattisen valon aallonpituuteen voidaan vaikuttaa valmistusvaiheessa sopivilla materiaalivalinnoilla. Valkoista valoa voidaan tuottaa lisäämällä sinisen tai UV – ledin pinnalle loisteainetta, joka muuntaa valon valkoiseksi tai vaihtoehtoisesti yhdistämällä eriväristen (punainen, vihreä, sininen) ledien valoa. (Schubert 2006; Žukauskas 2002)

Kasvihuoneissa käytettävissä suurpainenatriumlampuissa valo tuotetaan kaasupurkauksen avulla. Lampun sisällä olevaa katodia kuumennetaan sähkövirran avulla, jolloin siitä irtoaa elektroneja termisen emission avulla ympäröivään ksenonkaasuun. Purkausputken sähkökenttä saa vapaat elektronit kiihtyvään liikkeeseen putken anodia kohti. Elektronit virittävät putken natrium-, elohopea- ja ksenonatomeja korkeammille energiatioille törmätessään niihin. Viritystilan purkautuminen emittoi fotonin, jonka energia riippuu atomin viritystilan ja perustilan erotuksesta. Pienpaineisissa purkauslampuissa valoa emittoituu pääasiassa atomien resonanssitaajuuksilla, kun taas suurpaineisissa purkauslampuissa kaasun korkea

lämpötila ja paine saavat aikaan atomien itseabsorptiota, jossa purkausputken seinämien lähellä olevat atomit absorboivat resonanssitaajuista valoa. Itseabsorptio saa aikaan suurpainelampuille tyypillisen spektrin, jossa emittoitunut säteily on laajentunut leveämmälle aallonpituusalueelle samalla kun resonanssitaajuinen säteily on absorboitunut lähes täysin. (Halonen 1992; Simpson 2003)

4.2 Suurpainenatriumlampun spektri

Suurpainenatriumlamppujen suosio kasvihuonevalaistuksessa johtuu niiden korkeasta valotehokkuudesta. Kuvassa 4 on Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun valaistusyksikössä mitattu 400 W Philips Master GreenPower suurpainenatriumlampun spektri. Valmistaja markkinoi tuotetta pitkäikäisenä kasvihuonekäyttöön optimoituna lampuna (Philips 2009).



Kuva 4. 400 W suurpainenatriumlampun spektri.

Kuvasta huomataan, että lampun spektri painottuu kasveille tärkeälle PAR – alueelle (400 – 700 nm). Korkein spektrihiippu sijaitsee kuitenkin infrapuna-alueella 819 nm aallonpituudella. Natriumin itseabsorptiosta johtuva paikallinen säteilyminimi ja sitä ympäröivä spektrin laajentuminen voidaan havaita 590 nm kohdalla. Spektrihiiput johtuvat natrium-, elohopea- ja ksenonatomien viritystilojen purkautumisista.

Taulukossa 1 on mittausdatasta MATLAB – ohjelmistolla lasketut kokonaistehot sekä fotonivuot eri aallonpituusalueille.

Taulukko 1. 400 W suurpainenatriumlampun säteilyteho ja fotonivuo aallonpituusalueittain.

Aallonpituusalue	425 – 475 nm (sininen)	625 – 675 nm (punainen)	400 – 700 nm (PAR)	700 – 830 nm (infrapuna)
Teho	4,97 W	21,44 W	141,38 W	42,22 W
Fotonivuo	18,96 $\mu\text{mol/s}$	116,25 $\mu\text{mol/s}$	705,74 $\mu\text{mol/s}$	282,41 $\mu\text{mol/s}$

Taulukon arvoista voidaan edelleen laskea, että nimellisteholtaan 400 W suurpainenatriumlampun kuluttamasta sähköenergiasta noin 35 % saadaan muunnettua kasveille yhteyttämisen kannalta hyödylliseen muotoon. Lisäksi tästä PAR – alueen säteilystä noin 19 % osuu niille sinisen ja punaisen valon aallonpituusalueille, joilla kasvien yhteyttäminen on tehokkaimmillaan. Käytetyn mittausjärjestelmän kalibroitu mittausalue ei ulotu 830 nm pidemmille aallonpituuksille, mutta jo pelkän 700 – 830 nm aallonpituusalueen säteilytehon perusteella voidaan todeta, että merkittävä osa lampun säteilystä sijaitsee sähkömagneettisen spektrin infrapuna-alueella.

4.3 Ledien edut kasvihuonevalaistuksessa

Ledien avulla voidaan kasvihuoneen valaistuksen spektri optimoida kasveille sopivaksi painottaen niitä aallonpituusalueita, joita kasvit hyödyntävät tehokkaimmin. Samalla voidaan kasvihuoneen energiankulutusta pienentää jättämällä spektristä vähemmän tärkeitä ja mahdollisesti haitalliset aallonpituudet kokonaan pois. Ledien helpon säädettävyyden ansiosta voidaan spektriä säätää tarvittaessa erilaiseksi myös vuorokauden ajan tai kasvun vaiheen mukaan ja siten korostaa viljeltävässä kasvissa haluttuja ominaisuuksia. Myös himmennys on ledeillä yksinkertaista ja niitä voidaan helposti ohjata valoanturiin yhdistetyn mikrokontrollerin avulla vallitsevan päivänvalon mukaan, jos kasvuston valovirta halutaan pitää tasaisena.

Muihin valonlähteisiin verrattuna ovat ledit erittäin pienikokoisia, nykyiset teholedit ovat tyypillisesti suurimmilta dimensioiltaan muutaman millimetrin kokoluokkaa. Suurpainenatriumlamppuun verrattuna myös pinalämpötila on ledeillä huomattavasti pienempi. Valmistajan datalehden mukaan edellä mainitun 400 W Philips Master GreenPower suurpainenatriumlampun kuvun lämpötila on käytön aikana 450 °C, kun taas ledeillä pyritään puolijohderajapinnan lämpötila pitämään jäähdytyslementin

avulla mahdollisimman alhaisena. Varsinkin punaisilla ledeillä lämpötilan vaikutus valovirran suuruuteen on merkittävä, ja se voi pudota jopa puoleen puolijohteen lämpötilan kasvaessa 25 asteesta 100 asteeseen (Osram 2010). Pienen koon ja matalan pintalämpötilan ansiosta ledit voidaan sijoittaa lähemmäksi kasveja, jolloin tarvittavan säteilytehon määrä pienenee. Käyttämällä kollimoivia linsejä voidaan ledien valo edelleen kohdistaa tarkasti haluttuihin osiin kasvia.

Kurkun ja tomaatin viljelyssä varmistetaan alempien lehtien valotus käyttämällä ns. välivalotusta, jossa osa valaisimista on sijoitettu alemmaksi kasvatusrivien väliin. Ledien avulla voitaisiin välivalot tuoda vieläkin lähemmäksi kasveja, jolloin valaisimet eivät veisi käytävillä tilaa ja siten häiritsisi työntekoa. Ledien polttoikään vaikuttaa mm. puolijohderajapinnan lämpötila sekä käytettävä virta, mutta oikein suunniteltuna on ledeillä mahdollista päästä yli 100 000 tunnin polttoikään, mikä on huomattavasti suurempi kuin suurpainenatriumlamppujen 16 000 tuntia (Weise et al. 2009; Philips 2009). Tämä puolestaan vähentää huollon tarvetta sekä huoltokustannuksia, koska valaisimien vaihtoväli voidaan pidentää kuusinkertaiseksi.

4.4 Ledien haitat kasvihuonevalaistuksessa

Ledivalaistuksessa on kuitenkin myös ongelmakohtia, jotka täytyy ratkaista ennen kuin kasvihuoneiden suurpainenatriumlamput voidaan kokonaan korvata ledeillä.

Toistaiseksi ledit ovat vielä kalliita ja pienen koon takia niitä tarvittaisiin isossa kasvihuoneessa erittäin paljon. Edullisempänä ratkaisuna voisi olla nykyisten järjestelmien täydentäminen ledeillä esimerkiksi jossain tietyssä kasvun vaiheessa.

Vaikka lähelle kasveja sijoitettujen valaisimien säteilytehoa voidaan pienentää, saattavat ne varjostaa enemmän luonnonvaloa. Varjostuksen ja valaisimien etäisyyden merkitys kasvihuoneen energiankulutukseen olisi siten syytä selvittää.

Myös valon spektrin optimoiminen pelkästään kasvien ehdoilla saattaa aiheuttaa käytännön ongelmia kasvihuoneviljelyssä. Kuva 5 on Teknillisen korkeakoulun valaistusyksikön ja Helsingin yliopiston Maataloustieteiden laitoksen yhteisestä tutkimuksesta, jossa tutkitaan spektrin vaikutusta salaatin kasvatuksessa. Kuvan perusteella on täysin mahdotonta arvioida salaatin kuntoa tai väriä, koska valaisimen spektri koostuu yksinomaan sinisen ja punaisen valon aallonpituuksista. Myöskään kasvihuoneessa työskentelevän henkilökunnan työhyvinvoinnin kannalta ei sinipunainen valaistus välttämättä ole pitkällä aikavälillä paras ratkaisu. Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto NASA onkin tutkimuksissaan päätenyt lisäämään

miehitetyillä avaruuslennoilla käytettäviin salaatinkasvatuskammioihin myös vihreitä ledejä. Näin saadaan kasvit myös näyttämään eläviltä ja parannettua miehistön viihtyvyyttä pitkillä avaruuslennoilla, vaikka energiatehokkuuden kannalta olisi parempi käyttää vain sinipunaista valoa. (Kim et al. 2005)



Kuva 5. Salaatin kasvatusta ledien avulla.

4.5 Yhteenveto

Ledivalaistuksen hyödyllisyys kasvihuoneissa kiteytyy pääasiassa kahteen ydinkysymykseen: voidaanko ledien avulla optimoida ja tuottaa kasvien tarvitsema spektri suurpainenatriumlamppuja edullisemmin, sekä mikä on kaukopunaista valoa pidempiaaltoisen infrapunasäteilyn merkitys kasvien hyvinvoinnille. Valaistuksen kustannuksiin vaikuttaa paitsi sähkön hinta myös valaisimien, ledien, lamppujen ja niitä ohjaavan elektroniikan hinta ja hyötysuhde sekä valaistuksen huoltokustannukset. Lisäksi sinisen valon fotonivuon kasvattaminen nostaa kulutettua energiaa suhteessa enemmän kuin punaisen valon, sillä sinisen valon fotonin energia on punaisen valon fotonia suurempi.

Kasvihuoneen energiatalouden kannalta on hyvä muistaa, että kasvit pystyvät sitomaan vain noin 5 % lehden pinnalle saapuvasta valoenergiasta kemialliseen muotoon

(Fagerstedt et al. 2008). Jäljelle jäävä osa kulutetusta energiasta muuttuu lopulta lämmöksi, eikä kasvihuoneen lämpökuormituksen kannalta ole merkitystä, kuinka paljon valaisimen ottotehosta kuluu elektroniikan lämpöhäviöihin, infrapunasäteilyyn tai PAR – säteilyyn. Valaistuksen kokonaissähkötehon pienentäminen vähentää suoraan kasvihuoneen jäähtymisen ja tuuletuksen tarvetta lämpimänä vuodenaikana, jolloin myös hiilidioksidipäästöstä saadaan parempi hyöty. Samalla tietysti muun lämmitysenergian tarve lisääntyy kylmänä vuodenaikana, mutta suora sähkölämmitys harvoin on edullisin ratkaisu lämmitykseen.

Korkeilla säteilytehoilla ongelmaksi voi muodostua myös kasvin liiallinen lämpeneminen. Vaikka ledien avulla voidaan kasvin pinnan lämpenemistä vähentää eliminoimalla infrapunasäteilyn osuus spektristä, jää spektriin jäljelle vielä PAR – säteily, joka sekin absorboituessaan lämmittää kasvia ja kasvihuoneen ilmaa. Yhdistämällä aktiivinen nestejäähdytys ledien jäähdytyslementteihin on mahdollista pienentää kasvihuoneen lämpökuormitusta ja käyttää talteen otettua lämpöenergiaa esimerkiksi toimistotilojen tai käyttöveden lämmitykseen.

5 Tutkimuksia kasvihuonevalaistuksesta

Kasvihuonevalaistuksen tutkiminen on leditekniikan kehittymisen myötä helpottunut merkittävästi. Siinä missä spektrin vaikutukset kasveihin piti aiemmin tutkia prismojen avulla tai suodattamalla valoa erilaisilla värikalvoilla, voidaan nykyään haluttu spektri tuottaa huomattavasti yksinkertaisemmin käyttämällä ledejä. Tässä luvussa tarkastellaan kasvihuonevalaistuksesta tehtyjä tutkimuksia sekä selvitetään, miten niitä voidaan hyödyntää salaatin viljelyssä.

5.1 Leditutkimuksen alku

Ledien soveltuvuutta kasvihuonevalaistukseen on tutkittu jo yli kaksikymmentä vuotta. Ensimmäisten leditutkimuksen rahoittajia oli Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto NASA, jonka tutkimuksiin liittyvälle kasvivalaisimelle haettiin patenttia vuonna 1988. Kyseistä valaisinta ja siinä käytettäviä menetelmiä voidaan edelleenkin pitää varsin kehittyneinä mm. käytettyjen aallonpituuksien sekä ledien ohjauksen osalta. (Ignatius et al. 1991) NASAn kiinnostus kasvihuonevalaistukseen selittyy pitkien avaruuslentojen haasteilla – avaruussukkuloissa ei yksinkertaisesti ole tarpeeksi tilaa miehistön tarvitsemalle ravinnolle mm. Marsiin suuntautuvilla matkoilla. Kasvien avulla voitaisiin myös tuottaa happea sekä puhdistaa vettä. Ledien pieni koko, alhainen sähkönkulutus sekä pitkä polttoikä tekevät niistä ihanteellisen vaihtoehdon avaruussukkuloihin, joiden kokonaismassa pyritään saamaan mahdollisimman alhaiseksi. NASA on vuosien varrella tutkinut mm. lehtisalaatin, pinaatin, retiisin sekä erilaisten viljojen kasvatusta ledien avulla suljetussa kasvuympäristössä. (Kim et al. 2005)

5.2 Tutkimuksia lehtisalaatin valotuksesta

Lehtisalaatin valotusta on tutkittu laajasti, ja yksi syy siihen lienee lehtisalaatin kasvatuksen helppous. Matalana kasvina lehtisalaatti ei tarvitse runsaasti pystysuuntaista tilaa kasvihuoneessa. Yhden neliömetrin alalla voidaan helposti kasvattaa yli 20 kasvia, jotka ovat valmiita korjattavaksi noin kuukauden ikäisinä.

5.2.1 Spektri

Optimaalisen spektrin määrittämisessä täytyy kasvatuskokeiden tulokset analysoida tarkkaan sekä määrittää vaatimukset kasvin laadulle. Lehtisalaatilla suurempi lehtipinta-ala ei välttämättä ole eduksi, jos lehdet ovat samalla ohuet tai epämuodostuneet. Tasapainoisen kasvun saavuttamiseksi hyvä lähtökohta spektrille on käyttää 10 %

sinistä ja 90 % punaista valoa (Goins et al. 1997). Tarvittaessa voidaan punaisesta valosta 5 % korvata vihreällä (500 – 600 nm) valolla, jolloin kasvit saadaan myös näyttämään luonnollisilta ilman kasvun heikkenemistä. Vihreän valon lisääminen olemassa olevaan spektriin parantaa lehtisalaatin kasvua, kunhan sen osuus pidetään maltillisena. Kasvun on todettu heikkenevän, jos vihreän valon osuus ylittää 50 % kokonaisfotonivirrasta. (Kim et al. 2005)

Valon spektri vaikuttaa myös lehtisalaatin ravintosisältöön. Sinivihreän (500 nm) ja punaisen valon yhdistelmä alentaa hiilihydraattipitoisuutta huomattavasti sekä lisää lyhytketjuisten hiilihydraattien osuutta lehtisalaatissa. Ravitsemuksellisesti kumpikaan näistä ei ole toivottu ominaisuus. Sen sijaan sinisen ja punaisen valon yhdistelmällä on saatu selvästi parempia tuloksia korkean hiilihydraattipitoisuuden ja alhaisen nitraattipitoisuuden muodossa verrattuna loistelampun avulla kasvatettuun verrokkiin. (Urbonavičiūtė et al. 2007) UV – säteilyllä voidaan lisätä lehtisalaatin antosyaanipitoisuutta, joka punalehtisissä lajikkeissa saa aikaan tummanpunaisen värin (Britz et al. 2009; Li & Kubota 2009).

Käyttämällä fotoselektiivisiä kalvoja voidaan luonnonvalosta suodattaa ei-toivottuja spektrikomponentteja pois ja siten vaikuttaa kasveihin. Lehtisalaatin biomassan ja antioksidanttipitoisuuden todettiin kasvavan, kun luonnonvalosta vähennettiin kaukopunaisen valon osuutta fotoselektiivisillä kalvoilla (Magnani et al. 2007).

Keinovalotuksen infrapunasäteilyn vaikutus lehtisalaattiin riippuu kasvihuoneen lämpötilasta. Kuivamassan on todettu kasvavan lisääntyneen infrapunasäteilyn myötä vain, jos kasvihuoneen lämpötila on alle optimin. Jos lämpötila on jo ennestään korkea, heikentää lisääntynyt infrapunasäteily voimakkaasti kasvua. (Sager 1984)

5.2.2 Fotonivuo ja valojakson pituus

Fotonivuon ja valon kokonaisintegraalin yhteydessä täytyy ottaa huomioon myös kasvihuoneen hiilidioksidipitoisuus. Hiilidioksidin lisääminen edistää kasvamista, jolloin samaan kasvutulokseen päästään vähemmällä valotuksella. Both et al ovat todenneet tutkimuksissaan, että taulukon 2 yhdistelmät valon kokonaisintegraalille ja hiilidioksidipitoisuudelle tuottavat keskenään yhtä hyvät kasvutulokset lehtisalaatille.

Taulukko 2. Suositellut yhdistelmät valon kokonaisintegraalille ja hiilidioksidipitoisuudelle (Both et al. 1998).

DLI (mol/m ² d)	17	16	15	14	13	12	11
CO ₂ (ppm)	350	420	480	630	820	1270	1600

Näiden arvojen ylittäminen sai aikaan lehdenreunapoltetta. (Both et al. 1998) Luvussa 3 mainittujen salaatinviljelijöiden käyttämällä hiilidioksidipitoisuuksilla ja valojaksoilla saadaan tämän mukaan suositelluksi fotonivuoksi 170 – 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

Kitaya et al puolestaan suosittelevat lehtisalaatille vähintään 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ fotonivuota lehtien kompaktin muodon saavuttamiseksi. Fotonivuon kasvattaminen arvoon 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ei enää vaikuttanut lehtien pituuden ja leveyden suhteeseen. Alhaisella hiilidioksidipitoisuudella valojakson pidentäminen edisti kasvua, vaikka valon kokonaisintegraali pidettiin vakiona. (Kitaya et al. 1998)

Tarkastelluissa tutkimuksissa käytetyt fotonivuot vaihtelevat 140 – 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ välillä ja valojaksot 14 – 24 h välillä. Valon kokonaisintegraalit vaihtelivat siten 7 – 17,3 mol/m²d välillä (Yanagi et al. 1996; Kitaya et al. 1998; Tamulaitis et al. 2005; Goins 2001; Urbonavičiūtė et al. 2007; Li & Kubota 2009). Lisäksi Goto & Takakura ovat esittäneet täysin poikkeavan lähestymistavan lehtisalaatin valotukseen. Lyhentämällä 14 h valo- ja 10 h pimeäjakso 105 ja 75 minuutin mittaisiksi saatiin lehtisalaatin lehdenreunapoltetta vähennettyä merkittävästi, vaikka valon kokonaisintegraali pysyi yhtä suurena. Yli 6 h vuorokausi ei enää tuonut etua 24 h vuorokauteen verrattuna. (Goto & Takakura 2003)

5.2.3 Valotuksen vaikutus ravintosisältöön

Spektrin lisäksi myös fotonivuolla voidaan vaikuttaa lehtisalaatin ravintosisältöön. Kasvit reagoivat ympäristön aiheuttamaan stressiin tuottamalla erilaisia antioksidantteja, jotka suojaavat niitä mm. happiradikaalien aiheuttamilta soluvaurioilta. Korkean fotonivuon on havaittu lisäävän lehtisalaatin hiilihydraattipitoisuutta sekä antioksidanttipitoisuutta. (Zhou et al. 2009) Lehtisalaatin altistaminen kasvun loppuvaiheessa vuorokauden ajaksi voimakkaalle valolle (800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) todettiin lisäävän fenoliyhdisteiden pitoisuuden kolminkertaiseksi. Myös antioksidanttikapasiteetti kasvoi merkittävästi, eikä voimakkaasta valotuksesta ollut haittaa kasvulle. (Oh et al. 2009)

5.3 Muita tutkimuksia kasvihuonevalaistuksesta

McCree määrittä tutkimuksissaan yhteyttämisen hyötysuhdetta suhteessa kasvien absorboiman valon spektriin. Kaikilla tutkimuksessa käytetyillä kasveilla yhteyttäminen oli tehokkainta sinisen ja punaisen valon aallonpituuksilla. Sinisen valon hyötysuhde oli keskimäärin 70 % punaisen valon hyötysuhteesta. (McCree 1971) Vihreän valon hyötysuhde oli vain hieman sinistä pienempi – noin 60 % punaisen hyötysuhteesta, mutta kasvihuonevalaistuksen kannalta on otettava huomioon, että vihreää valoa absorboituu lehtiin selvästi muita aallonpituuksia vähemmän. Siten vihreän valon tuottamiseen kulutetusta energiasta voidaan yhteyttämisen hyödyntää vain murto-osa verrattuna sinisen ja punaisen valon tuottamiseen kulutetusta energiasta. Kasvihuonevalaistuksen energiankulutuksen minimoinnissa on siis perusteltua vähentää PAR – alueella ensisijaisesti vihreän valon määrää.

5.4 Leditutkimuksen nykytila

Japanin Tsukubassa marraskuussa 2009 järjestetyn 6th International Symposium on Light in Horticulture -konferenssin perusteella ovat ledit vallanneet kasvivalotustutkimuksen lähes kokonaan. Tällä hetkellä kasvivalotusta tutkitaan ledien avulla ympäri maailman monilla eri vihanneksilla, yrteillä, viljoilla, hedelmillä, marjoilla ja kukilla. (ISHS 2009) Leditutkimukset ovatkin tuoneet paljon uutta tietoa kasveista ja niiden kasvun säätelystä.

5.5 Yhteenveto

Tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan lehtisalaatin viljelyssä päästä nykyistä parempiin kasvutuloksiin, jos suurpainenatriumlamput korvataan ledeillä. Suurpainenatriumlamppujen spektrihiippujen ei ole todettu osuvan lehtisalaatin kannalta tärkeille aallonpituuksille. Eliminoimalla valaistuksen infrapunasäteily ja kohdistamalla spektrihiiput 425 – 475 nm ja 625 – 675 nm alueille suhteessa 1:10 varmistetaan valon tehokas hyödyntäminen. Lisäämällä spektriin hieman vihreää tai valkoista valoa saadaan kasvamista hieman tehostettua, mutta ennen kaikkea kasvit näyttämään luonnollisilta. Ledien avulla voidaan myös valon kokonaisintegraali ja fotonivuo pitää tasaisempana himmentämällä ledejä luonnonvalon lisääntyessä. Valottamalla lehtisalaattia kasvatuspöydän loppupäässä UV – ledeillä tai korkeammalla fotonivuolla voidaan ravintosisältöön vaikuttaa suotuisasti.

6 LED-kasvihuonevalaistuksen case-kohteita

Tässä luvussa tarkastellaan markkinoilta löytyviä kasvihuoneisiin tarkoitettuja ledivalaisimia sekä niiden ominaisuuksia.

6.1 Yleistä

Ledivalaistuksen yleistymistä kasvihuoneissa hidastaa vastaavat ongelmat, kuin muissakin valaistuskohdeissa. Kuluttajan kannalta helppo ratkaisu kodin yleisvalaistukseen olisi korvata olemassa olevien valaisimien hehkulamput E27 – kannalla varustetuilla ledilampuilla ja loistelamput lediputkilla. Huono puoli tässä on se, että ledit täytyy saada mukautumaan täysin erilaisille valonlähteille suunniteltuihin valaisimiin, jolloin väkisinkin joudutaan tekemään kompromisseja lampun teknisessä toteutuksessa. Parempiin tuloksiin päästäisiin suunnittelemalla valaisin alusta lähtien ledien ominaisuuksia hyödyntäen, mutta samalla jouduttaisiin vanhoja toimivia valaisimia korvaamaan uusilla.

Kasvihuoneiden suurpainenaatriumlamppujen korvaaminen ledeillä voidaan toteuttaa kahdella periaatteellisella tavalla. Ledivalaisin voidaan valmistaa siten, että sen koko ja fotonivuo vastaavat nykyisin käytettäviä järjestelmiä, jolloin valaisimen asennus ja käyttöönotto on helppoa. Uusi valaisin asennetaan suoraan vanhan tilalle, eikä uusia sähköasennuksia tarvitse tehdä. Kasvihuoneen rakenne pysyy myös entisellään, joten muutostöiden takia viljelyyn ei tule pitkiä taukoja.

Pienempään energiankulutukseen päästään kuitenkin tuomalla valaisimet selvästi lähemmäs kasveja. Lehtisalaatin viljelyssä tämä tarkoittaa esim. kasvatuspöydän poikki kulkevia tankomaisia valaisimia, joiden etäisyys kasveista on muutamia kymmeniä senttimetrejä. Säättämällä yksittäisiä tankoja voidaan spektriin tai fotonivuohon tehdä tarkkoja muutoksia, jotka kohdistuvat pienelle kasvatusalueelle. Tällä asennustavalla voitaisiin uudet kasvihuoneet rakentaa entisiä matalammiksi, kun taas vanhoissa kasvihuoneissa jouduttaisiin tekemään selvästi enemmän muutostöitä sekä huolehtimaan valaistusasennusten yhteensopivuudesta kasvihuoneen muihin rakenteisiin. Epäselvää on myös, miten valaisimien muuttunut lämpökuormitus vaikuttaa kasvihuoneen ilmastoon.

6.2 Case Philips

Suurista valaisinvalmistajista Philips on tuomassa markkinoille neljää kasvivalotukseen soveltuvaa ledivalaisinta. Valaisimista kaksi on tankomaisia ja pituudeltaan 48,5 cm sekä 123 tai 153 cm. Matalia valotasoja tarvitsevia kohteita varten on kehitetty nauhamainen järjestelmä, joka koostuu nauhakaapelilla yhdistetyistä pienistä ledimoduuleista. Valaisimien tarkkoja spektrejä ei ole ilmoitettu, mutta vaihtoehtoina on erilaisia sinisen, valkoisen, punaisen sekä kaukopunaisen kombinaatioita. Pisimmällä tangolla päästään 62,5 $\mu\text{mol/s}$ fotonivuohon tehon ollessa 40 W. Lisäksi kukintaa varten on erityisiä E27 – kannalla varustettuja ledilamppuja, joiden spektrissä on yhdistetty kaukopunaista, punaista ja valkoista valoa. Valaisimet ovat olleet toistaiseksi koekäytössä, eikä esim. Philipsin suomenkielisillä internetsivuilla ole lainkaan mainintaa ledien käytöstä kasvihuoneissa. (Philips 2010)

6.3 Case Valoya

Suomalainen Valoya Oy on kehittänyt ledivalaisimen, joka yrityksen mukaan korvaa 400 W suurpainenatriumlampun kasvihuoneessa. Alustavan datalehden mukaan valaisimen ottoteho on 152 W, mutta fotonivuota tai spektriä ei ole vielä julkaistu. Dimensioiltaan (52,0 * 31,5 * 12,2 cm) valaisin vastaa nykyisin käytössä olevia kasvihuonevalaisimia ja se on tarkoitettu asentaa suoraan nykyisten valaisimien tilalle. Yrityksen mukaan tavoitteena on ollut päästä vastaaviin kasvutuloksiin kuin suurpainenatriumlampuilla, mutta alustavissa kokeissa on ledivalaisimella saavutettu hieman aikaisempaa parempia tuloksia. (Valoya Oy 2009; ArcticStartup.com 2009)

6.4 Case Lioris

Hollantilainen Lioris B.V. valmistaa mm. ledeihin perustuvia tievalaisimia, lediputkia sekä ledien virtalähteitä. Kasvivalotukseen Lioris tarjoaa 80 W ledivalaisinta seitsemällä eri spektrivaihtoehdolla, mutta tarkkaa tietoa spektristä tai fotonivuosta ei ilmoiteta. Valaisin on tarkoitettu asennettavaksi nykyisten 400 W suurpainenatriumlamppujen tilalle. Yhtiön kotisivujen mukaan vesijäähdytteisen 250 W ledivalaisimen piti tulla markkinoille vuoden 2008 puolivälissä, mutta hankkeen etenemisestä ei ole mitään viitteitä. (Lioris B.V. 2008)

6.5 Case Netled

Toinen suomalainen yritys Netled Oy on lähestynyt kasvivalotusta sivusuunnasta innovatiivisella valaistusverholla. Tampereen ammattikorkeakoulussa kehitetyssä

ratkaisussa sinisiä ja punaisia ledinauhoja on kudottu yhteen verkkomaiseen rakenteeseen. Verho soveltuu mm. kurkun ja tomaatin välivalotukseen, ja ledien kirkkauden säätöön on tarkoitus kehittää luonnonvalon huomioon ottava ohjaus. Verhon rakenne mahdollistaa yrityksen mukaan ilman vaihtumisen, jolloin kasvihuoneen kosteus ja lämpötila pysyvät tasaisempina. Lisäksi ledinauhojen rakenne on vesitiivis mahdollistaen verhon helpon puhdistamisen. Toistaiseksi valaistusverhosta ei ole julkistettu tarkempia ominaisuuksia, kuten valon spektriä tai fotonivuota, mutta sen avulla arvioidaan päästävän 50 % energiansäästöön tulevaisuudessa. Järjestelmän on tarkoitus olla laajamittaisessa koekäytössä kesällä 2010. (Netled Oy 2010; Heiska 2008)

6.6 Case Fionia Lighting

Tanskalainen Fionia Lighting A/S on Etelä-Tanskan yliopiston kasvivalotustutkimuksista alkunsa saanut spin-off -yritys. Kehitteillä on mikrokontrollereiden ja valoantureiden avulla luonnonvalon mukaan automaattisesti säätyvä kasvivalaisin, jossa eri kasvien vaihtelevat tarpeet valolle on otettu huomioon. Toistaiseksi yritys on julkistanut valaisimistaan vain toimintaperiaatteen ja arvion 50 – 80 % energiansäästöstä perinteisiin valotusmenetelmiin verrattuna. (Invest in Denmark 2009; Environmental Technologies Action Plan 2009)

6.7 Case Heliospectra

Ruotsalainen Heliospectra AB ilmoittaa päässeensä tutkimuksissaan 50 % energiansäästöön ja 15 % tehokkaampaan kasvuun kehittämällään ledeihin perustuvalla valaistusratkaisulla. Tietokoneohjatussa järjestelmässä anturit tarkkailevat kasvien kuntoa, ja valaistusta säädetään reaaliajassa kasvien tarpeiden mukaan. Santa Maria AB:n kanssa tehdyissä kasvatuskokeissa on saatu mm. basilikan makuun vaikuttavat yhdisteet kaksinkertaistumaan. Yhtiön tavoitteena on saada valaistusjärjestelmä kaupalliseen tuotantoon vuoden sisällä. (Heliospectra AB 2010; Atl.nu 2010; Miljönytta 2009; Dubé 2008)

6.8 Case Lemnis Lighting

Hollantilainen Lemnis Lighting B.V. on yhdistänyt ledivalaisimeensa aktiivisen vesijäähdytyksen, jolla estetään ledien liiallinen kuumeneminen ja sen aiheuttama valovirran aleneminen. Talteen otettu lämpö voidaan edelleen käyttää lämmitykseen tai varastoida. Valaisin on suunniteltu täysin modulaariseksi, joten ledien kehittyessä voidaan ne myöhemmin tarvittaessa vaihtaa tehokkaampiin tai kokonaan toisiin

aallonpituuksiin. Kapeat tankomaiset valaisimet voidaan asentaa kasvihuoneen kattoon tai lähelle kasveja. Lemnis Lighting ilmoittaa päässeensä punaisilla ledeillä yli 2 $\mu\text{mol/s}$ ja sinisillä 1 $\mu\text{mol/s}$ fotonivuohon wattia kohden. Eri aallonpituuksia voidaan säätää toisistaan riippumatta ja siten hienosäätää spektri tarpeen mukaan. Yritys ilmoittaa järjestelmän energiansäästön olevan 35 – 50 % verrattuna perinteisiin valotusmenetelmiin. (Lemnis Lighting B.V. 2010; Rooymans 2009)

6.9 Yhteenveto

Intensiivisen tutkimustyön ja tuotekehityksen seurauksena markkinoille on lähivuosina tulossa monia kasvihuoneviljelyyn tarkoitettuja ledijärjestelmiä. Tällä hetkellä valmiita lediratkaisuja ei kuitenkaan vielä ole laajemmin tarjolla, ja uuden kasvihuoneen rakentaja joutuukin toistaiseksi tyytymään vanhoihin suurpainenatriumlamppuihin.

7 Tulevaisuuden valaistusratkaisut kasvihuoneissa

Jos ledien valotehokkuus jatkaa edelleen kasvuaan, voidaan jo muutaman vuoden päästä olla siinä tilanteessa, että kasvihuoneviljelyssä ryhdytään vakavasti harkitsemaan luonnonvalon jättämistä kokonaan pois. Varsinkin matalia kasveja, kuten lehtisalaattia, voitaisiin kasvattaa kerroksittain, jolloin viljelyyn tarvittava pinta-ala pienenisi merkittävästi. Vaikka luonnonvalo onkin ilmainen energianlähde, on sen säädettävyyden huomattavasti ledejä huonompi. Luonnonvalon poisjättämisellä voitaisiin varmistaa paitsi valotuksen, myös ilmasto-olosuhteiden muuttumattomuus kasvihuoneessa. Valotuksessa ei tarvitsisi välttämättä noudattaa 24 h vuorokauden pituutta, vaan valon ja pimeän rytmitystä voitaisiin manipuloida rajattomasti parhaan hyödyn saavuttamiseksi. Spektrin ja fotonivuon säätäminen valotuksen aikana perustuen ennalta määrättyyn suunnitelmaan tai kasvien kunnon tarkkailuun on myös mahdollista toteuttaa ledien avulla.

Jos luonnonvalon täydellinen poissulkeminen on liian radikaali toimenpide, on fotoselektiivisillä kalvoilla mahdollista suodattaa vain osa spektristä pois. Kasvihuoneesta yöllä ulos säteilevän valosaasteen vähentämiseksi tai vastaavasti pimeäjakson pidentämiseen saattaisi sähkökromaattisista kalvoista olla hyötyä. Kalvoon kytketyn jännitteen avulla säädettäisiin kalvon transmittanssia, jolloin kasvihuoneessa voitaisiin yölläkin käyttää voimakasta valotusta haittaamatta ympäristöä.

Ledien jälkeen seuraava askel kasvihuoneessa käytettävien valonlähteiden osalta saattaa olla orgaaniset ledi eli oledit, jotka voidaan valmistaa erittäin ohuiksi ja taipuisiksi kalvoiksi. Oledien valotehokkuus ja hinta eivät vielä tee niistä kilpailukykyisiä kasvihuonekäyttöön, mutta tekniikan kehittyessä niistä voi vielä tulla varteenotettava vaihtoehto. Oledien avulla saataisiin valon jakautuminen erittäin tasaiseksi valmistamalla koko kasvuston peittävä tasaisesti säteilevä pinta.

8 Johtopäätökset ja jatkotutkimuksen tarve

Vaikka tutkimuksia tehdäänkin kiivaasti ympäri maailman, on kasvivalotuksessa silti vielä paljon opittavaa. Nykyiselläkin tiedolla voidaan rakentaa kasvun kannalta tehokas, energiaa säästävä ledijärjestelmä, mutta ottamalla huomioon kasvilajien väliset yksilölliset tarpeet valotuksen suhteen voidaan todennäköisesti päästä vielä parempiin kasvutuloksiin.

Mielenkiintoisia kysymyksiä ledien käytöstä kasvihuoneissa on mm. ledien himmennykseen yleisesti käytetyn pulssinleveysmodulaation vaikutus kasveihin. Pulssinleveysmodulaatiossa ledejä kytetään päälle ja pois erittäin korkealla taajuudella, jolloin ihmisen havaitsema valon himmeneminen johtuu ledin suhteellisen johtoajan pientymisestä. Ledi loistaa edelleen yhtä kirkkaasti, mutta vain osan ajasta näyttäen siten himmeämmältä. Kasvien kannalta fotoneja saattaa kuitenkin tulla hetkellisesti liikaa, jolloin säteilyn käytön hyötysuhde pienenee.

Myös ledivalotuksen spektrin ja fotonivuon vaikutus salaatin lehdenreunapolteen muodostumiseen, ja voidaanko sitä ehkäistä muuttamalla valon parametreja kasvun aikana on kiintoisa tutkimusaihe. Samoin valon spektrin ja fotonivuon säätäminen valojakson tai kasvun eri vaiheissa saattaa vaikuttaa kasvien yleiseen hyvinvointiin.

9 Lähteet

- ArcticStartup.com, 2009. Lars Aikala Of Valoya. Saatavilla:
<http://www.arcticstartup.com/2009/12/21/lars-aikala-of-valoya/> [Viitattu 21.4.2010].
- Atl.nu, 2010. Boråsföretag hinner före de utländska jättarna - ATL Teknik. Saatavilla:
[http://www.atl.nu/Article.jsp?article=58116&a=Boråsföretag hinner före de utländska jättarna](http://www.atl.nu/Article.jsp?article=58116&a=Boråsföretag%20hinner%20före%20de%20utländska%20jättarna) [Viitattu 4.5.2010].
- Both, A., Albright, L. & Langhans, R., 1998. Coordinated management of daily PAR integral and carbon dioxide for hydroponic lettuce production. *Acta Hort. (ISHS)*, 456, 45-52.
- Both, A. et al., 1997. Hydroponic lettuce production influenced by integrated supplemental light levels in a controlled environment agriculture facility: experimental results. *Acta Hort. (ISHS)*, 418, 45-52.
- Britz, S., Mirecki, R. & Sullivan, J., 2009. Shedding Light on Nutrition.
- Dixon, J.M., Taniguchi, M. & Lindsey, J.S., 2004. PhotochemCAD 2: A Refined Program with Accompanying Spectral Databases for Photochemical Calculations.
- Dubé, S., 2008. System for modulating plant growth or attributes, WO 2008/118080 A1
- Einstein, A., 1905. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6), 132-148.
- Environmental Technologies Action Plan, 2009. Danish LED greenhouse system lights path to energy savings. Saatavilla:
http://ec.europa.eu/environment/etap/inaction/showcases/denmark/366_en.html [Viitattu 4.5.2010].
- Fagerstedt, K. et al., 2008. *Kasvioppi - Siemenestä satoon*, Helsinki: Edita.
- Ferentinos, K.P., Albright, L.D. & Ramani, D.V., 2000. Optimal light integral and carbon dioxide concentration combinations for lettuce in ventilated greenhouses. *J. Agric. Eng. Res*, 77(3), 309-315.
- Folta, K.M. & Maruhnich, S.A., 2007. Green light: a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*.
- Frigaard, N., Larsen, K.L. & Cox, R.P., 1996. Spectrochromatography of photosynthetic pigments as a fingerprinting technique for microbial phototrophs. *FEMS Microbiology Ecology*, 20(2), 69-77.
- Goins, G.D., 2001. Performance of salad-type plants grown under narrow-spectrum light-emitting diodes in a controlled environment. *Proceedings of Bioastronautics Investigators' Workshop*.

- Goins, G.D. et al., 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *Journal of experimental botany*, 48(7), 1407.
- Goto, E. & Takakura, T., 2003. Reduction of Lettuce Tipburn by Shortening Day/night Cycle. *J. Agric. Meteorol.*, 59(3), 219-225.
- Halonen, L., 1992. *Valaistustekniikka*, Espoo: Otatieto.
- Hart, J., 1988. *Light and plant growth*, (London, Boston): Unwin Hyman.
- Heiska, K., 2008. Kasvitarhoille haetaan suurta energiansäästöä. Saatavilla: <http://www.tiedetoimittaja.com/sivut/valaistusverho.html> [Viitattu 4.5.2010].
- Heliospectra AB, 2010. Saatavilla: <http://www.heliospectra.se/> [Viitattu 4.5.2010].
- Heuvelink, E. & Challa, H., 1989. Dynamic optimization of artificial lighting in greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)*, 260, 401-412.
- Huhtamaa, P., 2009. Suullinen tiedonanto, SSHLighting teknisen ryhmän kokous. Espoo, 17.12.2009.
- Ignatius, R.W. et al., 1991. Method and apparatus for irradiation of plants using optoelectronic devices, US 5,012,609
- Invest in Denmark, 2009. Bright idea from Danish lighting firm saves plant growers money. Saatavilla: <http://www.investindk.com/visNyhed.asp?artikelID=21438> [Viitattu 4.5.2010].
- ISHS, 2009. *6th International Symposium on Light in Horticulture, Scientific Program*, The International Society for Horticultural Science.
- Karhu, S., 2007. *Sadonkorjuu Tutkittua puutarhatuotantoa 2003 - 2005*, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus.
- Kim, H.H. et al., 2005. Evaluation of Lettuce Growth Using Supplemental Green Light with Red and Blue Light-Emitting Diodes in a Controlled Environment-a Review of Research at Kennedy Space Center. *V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture 711*. pp. 111-120.
- Kitaya, Y. et al., 1998. Photosynthetic Photon Flux, Photoperiod and Co2 Concentration Affect Growth and Morphology of Lettuce Plug Transplants. *HortScience*, 33(6), 988-991.
- Lemnis Lighting B.V., 2010. Saatavilla: <http://www.lemnislighting.com/> [Viitattu 5.5.2010].
- Li, Q. & Kubota, C., 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 59-64.

- Lioris B.V., 2008. Saatavilla: <http://www.lioris.nl/products.aspx?id=44#> [Viitattu 18.1.2010].
- Magnani, G. et al., 2007. Impact of Sunlight Spectrum Modification on Yield and Quality of Ready-to-Use Lettuce and Rocket Salad Grown on Floating System. *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007 801*. pp. 163–170.
- McCree, K., 1971. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191-216.
- Miljönytta, 2009. Ljus som växter gillar. Saatavilla: <http://miljonytta.se/livsmedel/ljus-som-vaxter-gillar/> [Viitattu 4.5.2010].
- Netled Oy, 2010. Saatavilla: <http://www.netled.fi/> [Viitattu 26.4.2010].
- Oh, M.M., Carey, E.E. & Rajashekar, C.B., 2009. Environmental stresses induce health-promoting phytochemicals in lettuce. *Plant Physiology et Biochemistry*, 47, 578-583.
- Osram, 2010. LR W5AM Golden DRAGON Plus Datasheet.
- Philips, 2010. Philips Horticulture. Saatavilla: <http://www.philips.com/horti> [Viitattu 5.5.2010].
- Philips, 2009. Philips MASTER GreenPower CG T 400 W E40 ISL Datasheet.
- Planck, M., 1901. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553-563.
- Poudel, P.R., Kataoka, I. & Mochioka, R., 2007. Effect of red- and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 92(2), 147-153.
- Raukko, E. & Jalkanen, J., 2009. *Näin joulutähdestä tulee joulutähti*, Kauppuutarhaliitto.
- Rooymans, J.O., 2009. Lighting device and lighting system for stimulating plant growth, US 2009/0039752 A1
- Sager, J.C., 1984. Spectral Effects on the Growth of Lettuce Under Controlled Environment Conditions. *Acta Hort. (ISHS)*, 148, 889-896.
- Schubert, E.F., 2006. *Light-Emitting Diodes* Toinen painos, Cambridge: Cambridge University Press.
- Simpson, R.S., 2003. *Lighting Control: Technology and Applications*, Oxford: Focal Press.

- van 't Ooster, A. et al., 2007. Use of Supplementary Lighting Top Screens and Effects on Greenhouse Climate and Return on Investment. *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007* 801, 645–652.
- Tamulaitis, G. et al., 2005. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, 3182–3187.
- Urbonavičiūtė, A. et al., 2007. Effect of short-wavelength light on lettuce growth and nutritional quality. *Sodininkystė ir daržininkystė*, 26(1), 157–165.
- Urbonavičiūtė, A. et al., 2008. The possibility to control the metabolism of green vegetables and sprouts using light emitting diode illumination. *Sodininkystė ir daržininkystė*, 27(2), 83–92.
- Valoya Oy, 2009. Valoya - advanced greenhouse lighting. Saatavilla: <http://www.valoya.com/> [Viitattu 21.4.2010].
- Weise, S. et al., 2009. Reliability if the DRAGON Product Family, Application Note.
- Yanagi, T., Okamoto, K. & Takita, S., 1996. Effects of blue, red and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. *Acta Hort. (ISHS)*, 440, 117-122.
- Zhou, Y. et al., 2009. Impact of Light Variation on Development of Photoprotection, Antioxidants, and Nutritional Value in *Lactuca sativa* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(12), 5494-5500.
- Žukauskas, A., 2002. *Introduction to Solid-State Lighting* Ensimmäinen painos, New York: Wiley.